

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Měření textury povrchů vytvořených
hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů**

**Measurement of Surfaces Texture Created by
Hydroabrasive Dividing of Fine Grain Materials**

Student:

Bc. Petr Hlaváček

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

OSTRAVA 2009

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrných materiálů

*Measurement of Surfaces Texture Created by Hydroabrasive Dividing
of Fine Grain Materials*

Student: Bc. Petr HLAVÁČEK
Studijní obor: 2303T002 – 00 Strojírenská technologie
Pracoviště: Katedra obrábění a montáže – 346

Zásady pro zpracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši
2. Příprava nanomateriálů
3. Z připravených nanomateriálů vytvořit hydroabrazivním dělením sadu vzorků určených pro měření textury povrchů
4. Nastudovat různé způsoby měření textury povrchů
5. Změřit texturu povrchů vytvořené sady vzorků různými metodami
6. Analyzovat a interpretovat experimentálně získaná data z textury povrchů

Pokyny pro zpracování:

Rozsah práce: Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Seznam doporučené literatury:

- BUMBÁLEK, B., OBVODY, V., OŠTÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha : SNTL, 1989.
- KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava : Miroslav Mračko, 1998, 384 s.
ISBN 80-8057-091-4.
- ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
- ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
- ZRNÍK, J., aj. *Příprava ultrajemnozrnných a nanokrystalických materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*, IV. řada, Evropská strategie výrobních procesů, 2007.
ISBN 978-80-7329-153-2.

Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.
Konzultant diplomové práce:	Ing. Robert ČEP, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce:	8. říjen 2008
Akademický rok:	2008/2009




.....
doc. Dr. Ing. Josef BRYCHTA
vedoucí katedry


.....
prof. Ing. Radim FARANA, CSc.
děkan

V Ostravě dne 1. říjen 2008

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Poděkování:

Ve své práci si dovoluji poděkovat za cenné připomínky a rady zejména mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. Dále děkuji doc. Ing. Miroslavovi Gregerovi, CSc. z FMMI za poskytnutí materiálů a zpřístupnění laboratoří pro provádění experimentů. Poděkování patří také Ing. Josefu Foldynovi, CSc. z Ústavu geoniky AV ČR za to, že mi umožnil využít jeho laboratoř pro uskutečnění experimentů.

ANOTACE

HLAVÁČEK, P. Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 48 s. Diplomová práce, vedoucí: Valíček, J.

V diplomové práci jsou prezentovány výsledky experimentů, které byly provedeny na technicky čisté mědi, za účelem zjištění vlivu velikosti zrna materiálu na mechanické vlastnosti a na texturu obrobeného povrchu. K vytvoření jemnozrnných materiálů byla použita technologie úhlového kanálového protlačování. Tato technologie patří mezi metody vytvářející extrémní plastickou deformaci. Pro obrábění jemnozrnných materiálů byla použita technologie abrazivního vodního paprsku. Řezné stěny byly měřeny pomocí kontaktního profilometru Surftest SJ401 a profilometru Hommel Tester T8000. Ze získaných výsledků vyplývá, že zjemnění zrna nepříznivě ovlivňuje výslednou texturu obrobeného povrchu.

ANNOTATION

HLAVÁČEK, P. Measurement of Surfaces Texture Created by Hydroabrasive Dividing of Fine Grain Materials. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009. 48 s. Diploma thesis, tutor Valíček, J.

In this diploma thesis are presented experiments results, which have been made for commercially pure copper, in order to findings influence of material grain size to mechanical properties and machined surface texture. For creation of fine-grain materials was used equal channel angular pressing technology. This technology belongs between methods creating several plastic deformation. For fine-grain materials machining was used abrasive waterjet technology. Cutting walls were measured by a contact profilometer Surftest SJ401 and a profilometer Hommel Tester T8000. From obtained results follows that the refinement of grain adversely affects the resultant texture of machined surface.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	1
Seznam použitých zkratk.....	1
Seznam použitých symbolů	2
1. ÚVOD	3
2. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	4
3. PŘÍPRAVA JEMNOZRNÝCH STRUKTUR KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	5
3.1. Metody vytváření extrémní plastické deformace.....	5
3.1.1. Opakované zvlňování a rovnání	7
3.1.2. Krut za vysokého tlaku	7
3.1.3. Cyklické protlačování – stlačování.....	8
3.1.4. Protlačování s krutem	8
3.1.5. Kumulativní válcování.....	9
3.1.6. Úhlové kanálové válcování.....	10
3.2. Úhlové kanálové protlačování	10
4. HYDROABRAZIVNÍ DĚLENÍ MATERIÁLU	13
4.1. Rozdělení kapalinových paprsků	13
4.2. Charakteristika technologie AWJ	14
4.2.1. Vznik nástroje	14
4.2.2. Působení nástroje	18
5. HODNOCENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHŮ	21
5.1. Drsnost povrchu	21
5.2. Měřicí prostředky.....	25
5.2.1. Mechanické metody	25
5.2.2. Optické metody	26
5.2.3. Jiné metody	26
6. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLŮ	27
6.1. Příprava vzorků úhlovým kanálovým protlačováním.....	27
6.2. Metalografické výbrusy	29
6.3. Měření tvrdosti.....	32
6.4. Příprava vzorků hydroabrazivním dělením.....	35
6.5. Metodika měření topografie povrchu	38
7. ZÁVĚR.....	42
SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	44
PUBLIKACE AUTORA SOVISEJÍCÍ S DANOU PROBLEMATIKOU	46
SEZNAM PŘÍLOH.....	48

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Seznam použitých zkratk

AFM	- atomový silový mikroskop (Atomic Force Microscopy)
ARB	- kumulativní válcování (Accumulative Roll Bonding)
ASJ	- abrazivní suspenzní paprsek (Abrasive Slurry Jet)
AWJ	- abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)
CEC	- cyklické protlačování – stlačování (Cyclic Extrusion – Compression)
ECAP	- úhlové kanálové protlačování (Equal Channel Angular Pressing)
ECAR	- úhlové kanálové válcování (Equal Channel Angular Rolling)
HPT	- krut za vysokého tlaku (High Pressure Torsion)
HV	- tvrdost podle Vickerse (Hardness Vickers)
MF	- víceosé kování (Multiaxial forging)
MFM	- magnetický silový mikroskop (Magnetic Force Microscopes)
RCS	- opakované zvlňování a rovnání (Repetitive Corrugation and Straightening)
RRS	- válcování s axiálním posuvem válců (Rolling + axial Rolls Shifting)
SEM	- skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscopes)
SPD	- extrémní plastická deformace (Severe Plastic Deformation)
STM	- řádkovací tunelový mikroskop (Scanning Tunnelling Microscope)
TE	- protlačování s krutem (Twist extrusion)
WJ	- vodní paprsek (Water Jet)
WJM	- obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining)

Seznam použitých symbolů

C_f	- koeficient odporu stěny materiálu	[-]
C_k	- koeficient charakteristické rychlosti	[-]
C_l	- koeficient druhu řezaného materiálu	[-]
d	- velikost zrna	[mm]
d_a	- průměr usměrňovací trysky	[mm]
d_0	- průměr vodní trysky	[mm]
f	- prostorová frekvence	[mm ⁻¹]
h	- tloušťka materiálu	[mm]
h_c	- řezná zóna	[mm]
h_d	- deformační zóna	[mm]
L	- vzdálenost trysky od povrchu materiálu	[mm]
l_a	- délka usměrňovací trysky	[mm]
l_p	- měřená délka	[mm]
l_r	- základní délka	[mm]
m_a	- hmotnostní tok abraziva	[kg.min ⁻¹]
p	- tlak kapaliny	[Pa]
Ra	- střední aritmetická odchylka profilu povrchu	[μm]
Rp	- výška největšího výstupku profilu povrchu	[μm]
Rq	- střední kvadratická odchylka profilu povrchu	[μm]
Rv	- hloubka nejnižší prohlubně profilu povrchu	[μm]
Rz	- největší výška nerovnosti profilu povrchu	[μm]
v_a	- rychlost pohybu abrazivních částic	[m.s ⁻¹]
v_e	- kritická rychlost abrazivních částic	[m.s ⁻¹]
v_p	- rychlost posuvu řezné hlavy	[m.s ⁻¹]
$y(x)$	- funkce popisující profil povrchu	[-]
ρ_p	- hustota abrazivního materiálu	[kg.m ⁻³]
σ_y	- mez kluzu materiálu	[MPa]
σ_0	- napětí potřebné k překonání třecího napětí mřížky	[MPa]

1. ÚVOD

Poptávka po modernějších a kvalitnějších materiálech je inspirací pro výzkum nových materiálů a technologií. V materiálovém inženýrství se stává dominantním oborem nanotechnologie. Vzniká otázka, a to bez ohledu na vývoj nových pokročilých materiálů, zda byly potenciální možnosti skryté v kovech a struktuře dostatečně prozkoumané. Další otázkou je, existují-li ještě i jiné metody pro získávání lepších vlastností dobře známých aplikovaných materiálů. Odpověď na tuto otázku má velký význam zejména u materiálů vyráběných prostřednictvím objemového tváření kovů.

Předmětem současného intenzivního výzkumu je zjemňování struktur různých typů kovů, které mají při pokojové teplotě nízkou hodnotu základního deformačního odporu. V této oblasti se velmi dobře jeví progresivní technologie objemového tváření pomocí extrémních plastických deformací (SPD, severe plastic deformation). Cílem SPD je dosáhnout struktury s rozměry na úrovni nm, tj. ultrajemnou strukturu z původní struktury o rozměrech μm [1], [2].

S tvorbou nových materiálů ovšem neustále rostou požadavky na zvýšení produkce obrábění materiálů o vysoké pevnosti a tvrdosti (např. titan, nikl, kompozitní materiály, atd.). Konvenční metody obrábění nejsou vždy technicky a ekonomicky vhodné pro obrábění takovýchto materiálů, proto se stále více dostávají do popředí nové tzv. „nekonvenční“ metody obrábění. Tyto nekonvenční metody obrábění se uplatňují zejména tam, kde jsou klasické metody málo účinné, nebo kde úplně selhávají. Využívají nejrozumnější fyzikální principy obrábění materiálu (např. chemické, elektro-chemické, mechanické, aj.) [3], [4].

Jednou z těchto nekonvenčních metod je i obrábění vysokorychlostním kapalinovým paprskem, zejména pak vysokorychlostním kapalinovým paprskem s přísadou silně abrazivních látek. Vysoká rychlost vytékajícího proudu vody s příměsí abraziva umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky širokou škálu průmyslových materiálů od papíru, lepenky, dřeva, plastu, korku, stavebních hmot a hornin až po kovy a jejich slitiny. Jde tedy v oboru obrábění o vysoce aktuální technologii právě pro její univerzálnost a šetrnost k životnímu prostředí [5].

2. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je určení vlivu velikosti zrna na mechanické vlastnosti a na topografii povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením materiálu.

K dosažení cíle diplomové práce bylo potřeba provést:

- rozbor stávajících metod přípravy jemnozrnných materiálů,
- rozbor technologie hydroabrazivního dělení,
- rozbor stávajících metod hodnocení topografie povrchu,
- vytipování vhodných faktorů pro posouzení vlivu velikosti zrna na topografii povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením,
- analýzu a komparaci experimentálně získaných dat,
- interpretaci získaných poznatků.

3. PŘÍPRAVA JEMNOZRNÝCH STRUKTUR KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Technologie výroby objemově masivních jemnozrnných materiálů jsou založeny na extrémní plastické deformaci. Extrémní plastická deformace vyvolává v kovových materiálech výrazné zjemnění jejich struktury, které vede k výrazným změnám jejich vlastností. Byly pozorovány zejména změny mechanických vlastností (pevnost, tvrdost, tažnost, lomová houževnatost, únava, creep, superplastické chování), korozních vlastností, magnetických vlastností, změny vnitřního tlumení a další [2].

Závislost mezi velikostí zrna a úrovní meze kluzu popisuje Hall – Petchův vztah:

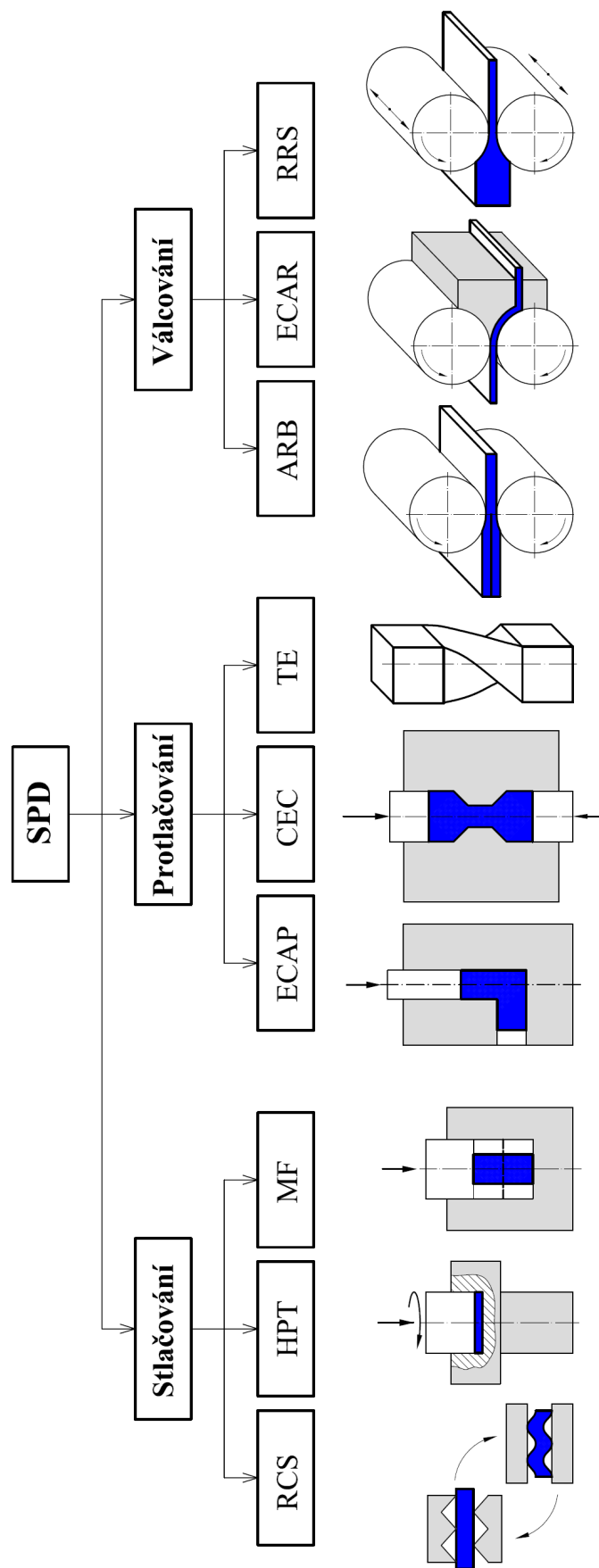
$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

kde σ_y je mez kluzu, σ_0 je napětí potřebné pro překonání třecího napětí mřížky, odporu rozpuštěných cizích atomů, odporu precipitátů přítomných v matici a defektů mřížky, k je konstanta, která je měřítkem stříhového napětí potřebného pro uvolnění nahromaděných dislokací a d je velikost zrna. Tento vztah je použitelný v široké oblasti velikostí zrn, a to až do několika desítek nm. Hledání možností efektivního zjemňování struktury kovových materiálů vedlo k významným modifikacím technologie tepelně mechanického zpracování, které umožňují dosáhnout velikosti zrna na úrovni nm.

Vzrůstající zájem o jemnozrnné, ultrajemnozrnné a nanokrystalické kovové materiály, které lze pozorovat v posledním desetiletí, vedl k vývoji různých metod jejich přípravy. Tyto metody jsou založeny na použití extrémní plastické deformace hrubozrnných materiálů [2].

3.1. Metody vytváření extrémní plastické deformace

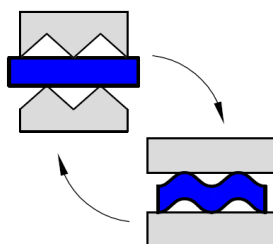
Za posledních 30 let byla vytvořena celá řada metod pro vytváření extrémní plastické deformace. Na obr. 3.1 je uveden přehled nejčastěji používaných metod. Metody jsou rozděleny do tří skupin, a to na metody vytvářející extrémní plastickou deformaci stlačováním, protlačováním a válcováním. V dalších podkapitolách jsou uvedeny principy a stručné charakteristiky nejčastěji používaných metod. Detailněji je popsána metoda úhlového kanálového protlačování (ECAP), která byla použita pro vytvoření vzorků s různou velikostí zrna v experimentální části.



Obr. 3.1 Rozdělení metod pro vytváření extrémní plastické deformace.

3.1.1. *Opakované zvlňování a rovnání*

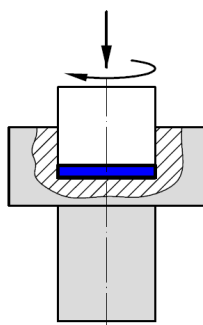
Metodu opakovaného zvlňování a rovnání (RCS, Repetitive Corrugation and Straightening) vynalezl v roce 2001 Y. T. Zhu z Národní laboratoře v Los Alamos. Metoda RCS spočívá v ohýbání rovného sochoru nástrojem, jehož povrch je drážkovaný a poté v opětovném vyrovnání sochoru plochým nástrojem (obr. 3.2). Pro dosažení velkých deformací a požadované mikrostruktury je zapotřebí opakování procesu (obvykle s rotací sochoru podél jeho osy mezi jednotlivými cykly) [6].



Obr. 3.2 Schéma metody opakovaného zvlňování a rovnání (RCS).

3.1.2. *Krut za vysokého tlaku*

Metoda krutu za vysokého tlaku (HPT, High Pressure Torsion) byla poprvé použita pro dosažení extrémní deformace ve vzorku, a to v Rusku v roce 1984. Úspěšné zvládnutí vytváření homogenních struktur se submikronovou a nanometrickou velikostí zrna a velkoúhlovými hranicemi zrn v podmínkách extrémní krutové deformace poskytlo novou možnost pro přípravu nanostrukturních materiálů [2]. Schéma metody je uvedeno na obr. 3.3.

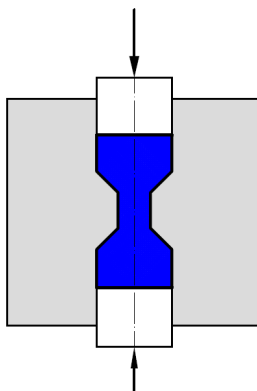


Obr. 3.3 Schéma metody krutu za vysokého tlaku.

Vzorky jsou diskového tvaru, obvykle o průměru 10–20 mm a o tloušťce od 0,2 do 0,8 mm. Umisťují se mezi dvě kovadliny, z nichž jedna se otáčí a druhá je pevná. Tření za rotace mezi kovadlinou a povrchem vzorku umožňuje plynule zvyšovat stříhovou deformaci. Přiložená tlaková síla (1–10 GPa) v průběhu stříhové deformace účinně omezuje možnost porušení vzorku, přispívá k vyvolání extrémních deformací, a to i za studena velmi těžce tvářitelných materiálů. Podstatné zjemnění struktury bylo pozorováno již po půl otáčky nebo celé otáčky kovadliny. Pro dosažení homogenní struktury je však obvykle zapotřebí více otáček [2].

3.1.3. *Cyklické protlačování – stlačování*

Schéma metody cyklického protlačování – stlačování (CEC, Cyclic Extrusion – Compression) je znázorněno na obr. 3.4 [2]. Metodu vynalezli J. Richert et al. v roce 1979. Funkce zařízení je založena na tom, že po vytvoření počátečního tlaku na vzorek zůstávají písty v klidové poloze, zatímco rám a s ním spojená zápustka se cyklicky pohybují. Tvářecí síla a napětí v zápustce závisejí do značné míry na tření. Se zvětšujícím se třením obě veličiny význačně rostou. Pro provoz zařízení jsou zapotřebí velké a nákladné lisy. Materiál zápustky se obtížně vyrovnává s tlaky až 4 GPa, zejména v oblasti tahových napětí. Problém se řeší předpjatými zápustkami. Životnost zápustek je nízká. Metoda CEC je vhodná pro tváření měkkých slitin, např. slitin hliníku.

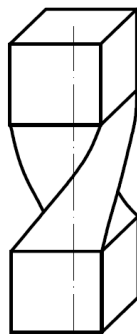


Obr. 3.4 Schéma metody cyklického protlačování – stlačování (CEC).

3.1.4. *Protlačování s krutem*

Princip metody protlačování s krutem (TE, Twist Extrusion) spočívá ve vytvoření intenzivní stříhové deformace protlačováním sochorů pravoúhlého průřezu zápustkou se zkrouceným kanálem (obr. 3.5) [8]. Tvar a průřez kanálu se podél osy protlačování

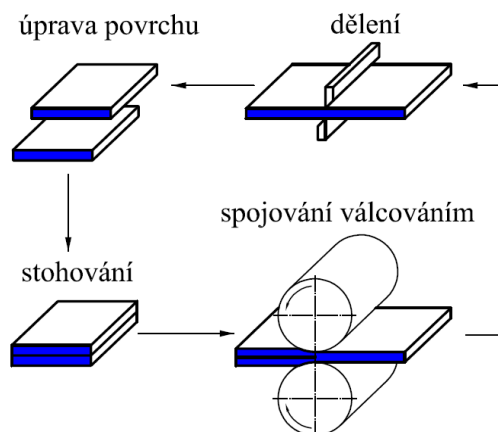
nemění, zatímco kanál je podle této osy zkroucen. Rovněž tvar a průřez výtlačku se nemění, což dovoluje opakované protlačování a tudíž akumulaci plastické deformace. Stříhová deformace není při zkroucování sochoru rozložena po jeho průřezu rovnoměrně. Větší část deformace je při průchodu zápustkou soustředěna na vstupu a výstupu ze zkroucené části zápustky. Nejmenší deformace je v ose tvářeného sochoru a největší pak na nejvzdálenější části sochoru od osy.



Obr. 3.5 Schéma vzorku při protlačování s krutem (TE).

3.1.5. Kumulativní válcování

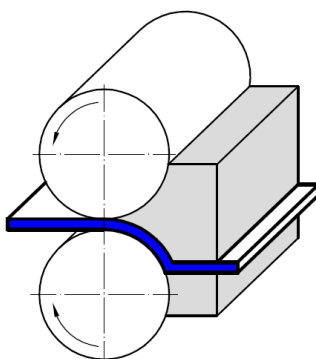
Kumulativní válcování (ARB, Accumulative Roll Bonding) je slibná metoda zjemňování zrna s využitím extrémní plastické deformace. Metodu vyvinuli Y. Saito, N. Tsuji a spolupracovníci z Osaka University [9]. Její schéma je znázorněno na obr. 3.6. Podstata metody spočívá v tom, že pás z daného materiálu, vyválnovaný na 50 % své původní tloušťky, se rozdělí na dva stejně dlouhé kusy o stejné tloušťce, které se položí na sebe a společně znovu válcují. ARB není jen válcovací proces, ale současně proces, při kterém dochází ke spojování pásů. Pro dosažení dobrého spojení pásů se pásy před stohováním upravují (odmašťují, kartáčují). V některých případech se sestohované pásy pro dosažení dobrého spojení pásů a snížení válcovací síly ohřívají pod rekrytalizační teplotu a ihned válcují. Tento postup lze bez omezení opakovat, takže lze dosáhnout velké kumulované plastické deformace.



Obr. 3.6 Princip metody kumulativního válcování.

3.1.6. Úhlové kanálové válcování

Princip úhlového kanálového válcování (ECAR, Equal Channel Angular Rolling) je znázorněn na obr. 3.7. Jedná se v podstatě o metodu ECAP upravenou pro plynulé tváření. Metoda je určena především pro tváření tenkých pásů. Plynulé protlačování nastane, když třecí síla mezi válci a plechem je větší než síla protlačování. Pro vyvolání tohoto jevu jsou povrchy válců zdrsňeny [10].

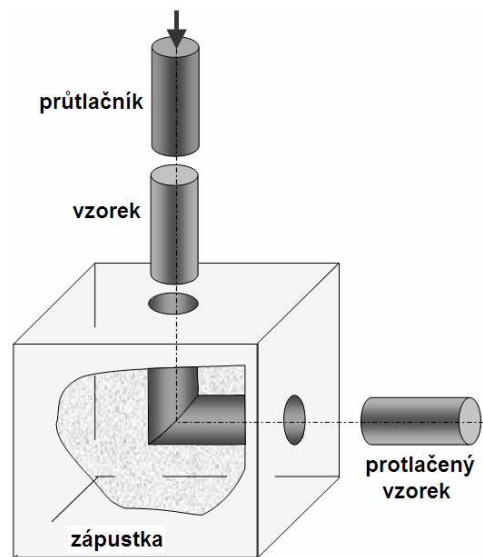


Obr. 3.7 Princip úhlového kanálového válcování (ECAR).

3.2. Úhlové kanálové protlačování

Podstatou úhlového kanálového protlačování (ECAP, Equal Channel Angular Pressing) je extrémní deformace masivních vzorků kruhového nebo čtvercového průřezu uskutečněná čistým stříhem. Tuto metodu navrhl jako první V. M. Segal se svými spolupracovníky v 70. až 80. letech minulého století a o její rozvoj se zasloužil především

R. Z. Valiev [1]. Cílem metody je silné přetvoření materiálu beze změny průřezu vzorku (obr.3.8).

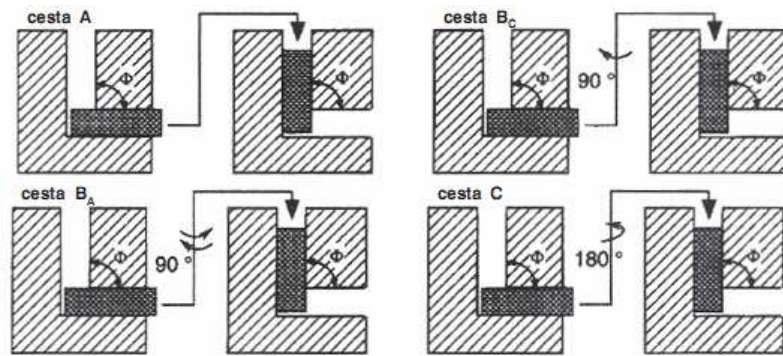


Obr. 3.8 Princip úhlového kanálového protlačování.

Při metodě ECAP je vzorek vícekrát protlačován zápustkou, ve které se protínají dva kanály, svírající úhel obvykle 90° (ale může být i jiný). Protlačování se realizuje buď při pokojové nebo zvýšené teplotě [2].

Výběr deformační cesty a počet průchodů jsou kritickými faktory pro vývoj mikrostruktury a výsledné vlastnosti. Při protlačování vzorku po sobě následujícími průchody je možné jeho rotací po každém průchodu měnit charakteristiky stříhového namáhání. Při kanálovém protlačování je možné použít čtyři různé deformační cesty protlačování - otáčení vzorku (obr. 3.9). Jde o tyto deformační cesty:

- Cesta A – sochořem se po každém průchodu neotáčí.
- Cesta B_C – sochořem se po každém průchodu otáčí o 90° ve směru hodinových ručiček.
- Cesta B_A – sochořem se po každém průchodu otáčí střídavě o 90° ve směru a proti směru hodinových ručiček.
- Cesta C – sochořem se otáčí po každém průchodu v podélné ose o 180° .



Obr. 3.9 Čtyři deformační cesty při protlačování metodou ECAP.

Metoda ECAP je proces vhodný zejména pro tváření kovů. Tento proces je založený na operacích, které se mnohokrát opakují, dokud není dosaženo celkové hodnoty deformace potřebné pro žádané zjemnění zrna. Pravidla pro vytvoření návrhu souvisejících operací nezbytných pro plynulou výrobu jemnozrnných kovových materiálů jsou do značné míry podobná standardním tvářecím postupům. Konstrukteři musí respektovat ekonomii výroby, což vyžaduje co nejméně tvářecích operací, jednoduchou údržbu nástrojů a vhodný výběr materiálu zápusky a doprovodných zařízení. Původní provedení metody ECAP má určitá omezení. Jde zejména o poměrně krátkou délku zpracovávaného kusu a z toho omezení plyne diskontinuita procesu s nízkou účinností a vysokými náklady. Konce výtlačku obvykle obsahují nerovnoměrnou strukturu a mikrotrhliny, a proto musí být část výtlačku oddělena a sešrotována, což opět zvyšuje náklady.

4. HYDROABRAZIVNÍ DĚLENÍ MATERIÁLU

Technologie obrábění kapalinovým paprskem je jedinečná a perspektivní technologie. Vyznačuje se výjimečnými vlastnostmi jako např. tím, že místo řezu je studené (tj. nedochází k tepelnému ovlivnění obrobků a ke změnám struktury materiálu), dále technologie je bezprašná a nevznikají škodlivé emise, tím je vysoce ekologická, vzniká minimální silové působení paprsku na řezaný materiál (nedochází ke vzniku mikrotrhlin) [3], [4], [5].

Princip obrábění kapalinovým paprskem spočívá v generování vysokého tlaku kapaliny (nejčastěji vody), která při protékání tryskou malého průměru získává velmi vysokou kinetickou energii. Tím vzniká flexibilní nástroj, který je schopen obrábět všechny známé materiály.

4.1. Rozdělení kapalinových paprsků

Principiální a názorné dělení kapalinových paprsků je na obr. 4.1 [11]. Zvýrazněná pole na tomto obrázku představují technologii, kterou byly nařezány měřené vzorky, jak je uvedeno dále v kapitole 6.



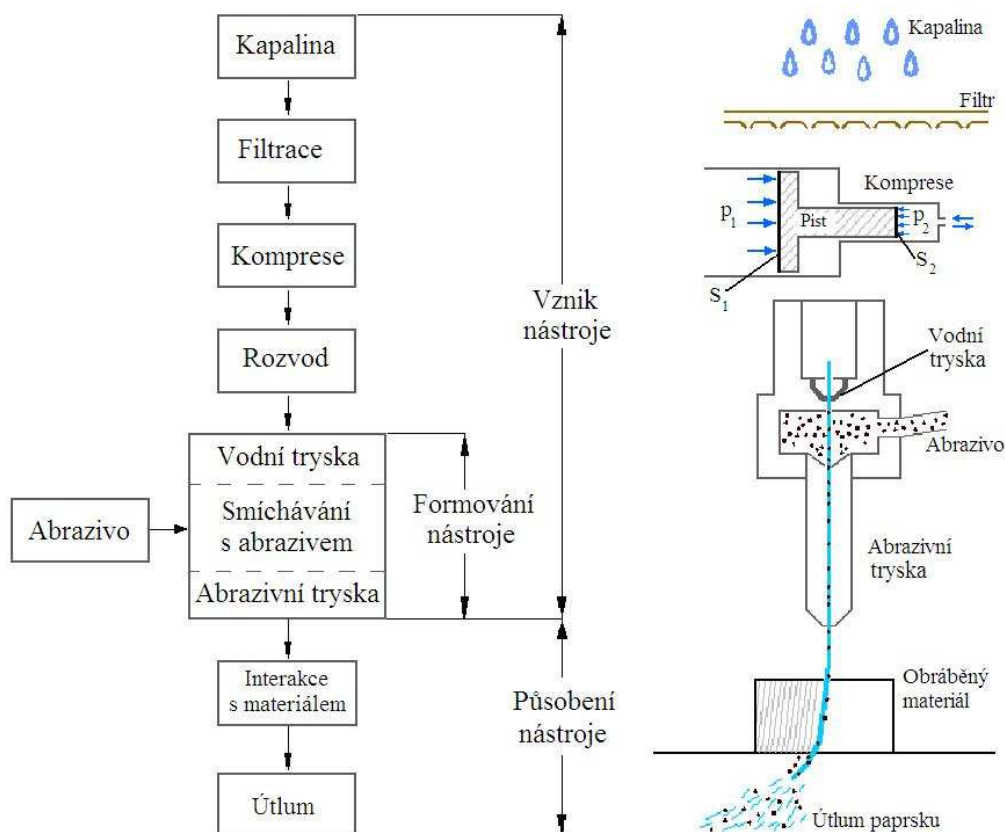
Obr 4.1 Rozdělení kapalinových paprsků.

V současné praxi nachází největší uplatnění čistý kapalinový paprsek (WJ, Water Jet) a abrazivní kapalinový paprsek (AWJ, Abrasive Water Jet).

4.2. Charakteristika technologie AWJ

V rámci diplomové práce bude představena technologie abrazivního vodního paprsku, který patří mezi nejrozšířenější a se kterým jsem se mohl seznámit jednak na Institutu fyziky HGF VŠB-TUO a také na Ústavu Geoniky AV ČR, v.v.i. v Ostravě.

Hlavní oblasti procesu vzniku, formování a působení nástroje na obráběný materiál názorně zobrazuje obr. 4.2.



Obr 4.2 Schéma vzniku, formování a působení AWJ na obráběný materiál.

4.2.1. Vznik nástroje

Kapalina

Výběr druhu pracovní kapaliny je základní faktor ovlivňující efektivnost technologie. Pracovní kapalina pro AWJ musí splňovat následující požadavky:

- nízkou viskozitu zabezpečující malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím, hadicemi apod.,
- běžnou přístupnost a nízkou cenu,
- minimální agresivnost s ohledem na kovové části zařízení,

- schopnost splnit hydrodynamické charakteristiky vysokorychlostního paprsku malého průměru,
- schopnost zabezpečovat nejlepší kvalitu obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku.

Mnohé z výše uvedených požadavků jsou protichůdné a při konkrétních aplikacích se mohou vzájemně vylučovat. Avšak z globálního aspektu uvedené požadavky nejlépe splňuje voda, která je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická [5].

Filtrace a úprava kapaliny

Předpokladem pro dlouhodobý chod zařízení je správná filtrace vstupní kapaliny. Přítomnost pevných částic ve vodě urychluje opotřebení všech částí zařízení (stěny trubek, stěny válců), dochází k ucpávání ventilů, tuhé částice v kontaktu s těsněním způsobují jeho netěsnost. Kromě filtrace se voda také změkčuje, deionizuje atd.

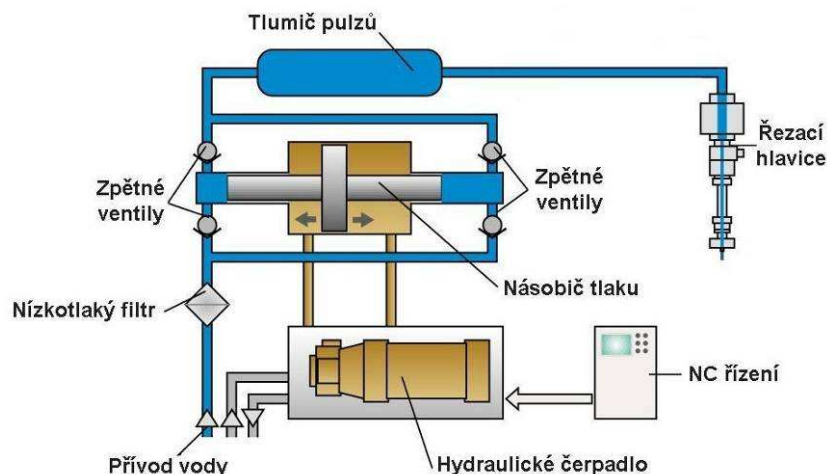
Komprese

Působení vodního paprsku na materiál je podmíněno velikostí tlaku kapaliny.

Úlohou tlakového systému daného zařízení je plynulé generování stlačené kapaliny s konstantní hodnotou tlaku. V rámci technologie se používají dva druhy zařízení generujících vysokotlaký vodní paprsek, jejichž použití v systémech je podmíněné hodnotou výstupního tlaku vody. Jde o zařízení s triplexovým plunžrem a o zařízení s multiplikátorem.

Zařízení s triplexovým plunžrem – dříve se tento kompresor používal v aplikacích, kde vodní paprsek plnil funkci čistícího nástroje, tj. na odstraňování starých nátěrů, čištění stěn ve výměnících tepla, atd. Bylo to dáno konstrukcí, kdy pracovní tlak média nepřevyšoval hodnoty 150 - 200 MPa [5]. V současnosti se tlak generovaný tímto čerpadlem pohybuje mezi 280 - 350 MPa a je tedy možné jej použít i v aplikacích řezání materiálů.

Zařízení s multiplikátorem - zařízení vyvíjející tlak 300 - 400 MPa je označované jako multiplikátor („násobič“). Činnost hydraulického multiplikátoru je založena na rovnováze sil působících na nestejně plochy diferenciálního pístu. Změnu parametrů tlakové energie vyvolávají rozdíly pracovních ploch vysokotlakého a nízkotlakého pístu. Schematické znázornění hydraulické jednotky s multiplikátorem je na obr. 4.3.



Obr 4.3 Schéma hydraulické jednotky s multiplikátorem [5].

Rozvod stlačené kapaliny

Stlačená kapalina je přivedena přes vysokotlaké potrubí do pohybujícího se zařízení řezací hlavy. Na výrobu vysokotlakých potrubí a armatur se nejčastěji používají vysokopevné nerezové materiály (např. ocel ČSN 17 346, ČSN 17 348, atd.) [5].

Vodní tryska

Na vstupu do řezací hlavy je umístěna vodní tryska. Při přechodu kapaliny tryskou dochází k transformaci potenciální energie kapaliny na kinetickou energii. Kvalita a způsob této transformace mají zásadní vliv na celkovou účinnost nástroje. Vodní tryska uskutečňuje usměrnění paprsku s cílem vytvoření kompaktního proudu kapaliny. Vytvoření souvislého homogenního paprsku tvoří základ tvaru nástroje, jehož tvar se kopíruje do obráběného materiálu. Cílem formování paprsku při přechodu vodní tryskou je transformace energie, změna průměru paprsku a zvýšení rychlosti paprsku.

Smíchávání s abrazivem

Proces přimíchávání abrazivního materiálu do čistého vodního paprsku probíhá ve směšovací komoře umístěné v řezací hlavě. Tato komora má specifický tvar a velikost, vstupuje do ní pracovní kapalina s vysokým tlakem (200 - 400 MPa) po výstupu z vodní dýzy. Při přechodu kapaliny do rozšiřujícího se prostoru komory se mění laminární proudění na turbulentní, dochází k částečnému víření kapaliny a v prostoru komory vzniká podtlak. V důsledku podtlaku dochází k přísávání příslušného abraziva ze zásobníku, které je potom v komoře strháváno paprskem kapaliny. Dochází k urychlení abrazivních částic

kinetickou energií kapaliny. Cílem optimálního procesu smíchávání je dosažení rovnoměrného rozptýlení zrn určeného objemu abraziva v proudu kapaliny.

Abrazivo

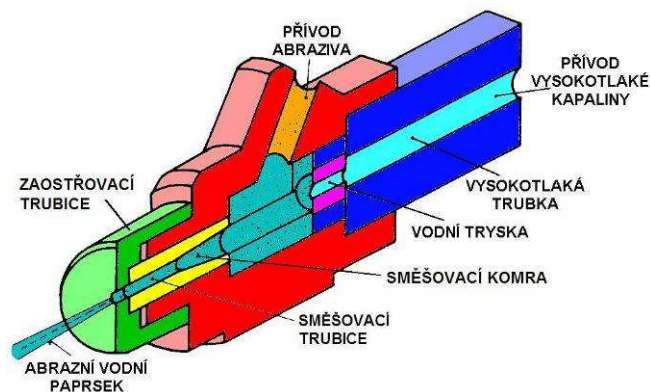
Výběr vhodného abraziva je velmi důležitý, protože náklady na abraziva představují největší položku při řezání AWJ [4]. Musíme volit kompromis mezi těmito faktory:

- Tvrdost abraziva – tvrdší abraziva mají vyšší účinnost při řezání, ale na druhou stranu dochází k rychlejšímu opotřebení abrazivní dýzy.
- Velikost abrazivních zrn – řezáním s menšími částicemi se dosáhne nižší drsnosti povrchu, ale prodlouží se čas potřebný k přeřezání materiálu. Velikost zrna se udává v jednotkách MESH, což označuje počet ok síta na délce jednoho palce (např. pro MESH 80 je velikost zrna asi 180 μm).
- Tvar abrazivních zrn – vyznačuje se kruhovitostí a kulatostí. Použitím kulatějších zrn docílíme menší drsnosti povrchu na úkor dosažené hloubky řezu.
- Hmotnostní tok abraziva – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje dosahovaná hloubka řezu, protože se zvětšuje kinetická energie paprsku. Ovšem při překročení kritického hmotnostního toku abraziva dosahovaná hloubka řezu klesá.
- Ekologičnost abraziva – ne všechna technicky a ekonomicky vhodná abraziva splňují bezpečnostní požadavky a požadavky na zdravotní nezávadnost.
- Cena abraziva – levnější abraziva mají menší účinnost, ale ta není v lineárním vztahu k provozní charakteristice.

Výše uvedené parametry nejlépe splňují: granátový písek, olivínový písek, korundový písek, ocelové piliny, litinové kuličky, karbid bóru (B_4C), kubický nitrid bóru (BN), karbid křemíku (SiC), atd. [12].

Abrazivní tryska

Stlačená kapalina se smíchává ve směšovací komoře s abrazivem. Vzniklá směs prochází přes abrazivní trysku. Během průchodu tryskou dochází k vytvoření koherentního paprsku, tj. paprsku stlačené kapaliny s abrazivem. Průměr a délka abrazivní trysky určují vlastnosti vystupujícího paprsku. Průměr abrazivní trysky se pohybuje v rozmezí od 0,8 do 2,2 mm. Schematické znázornění řezné hlavy je na obr 4.4 [5].



Obr. 4.4 Schematické znázornění řezné hlavy fy. SUGINO Machine Ltd.

Základním požadavkem na trysku, ve které probíhá proces formování konečného tvaru nástroje-paprsku, je vysoká míra otěruvzdornosti. Abrazivní trysky se vyrábějí práškovou metalurgií z karbidu wolframu, kubického nitridu bóru a nejnověji z karbidu wolframu s iontovou implantací nebo z řezné keramiky [5]. I přes velkou materiálovou odolnost trysky dochází postupně, a to vlivem neustále proudící vysokoerozivní směsi, k jejímu opotřebení. Projevem opotřebení je lokální zvýšení vnitřního průměru, což se projeví ve zhoršené kvalitě koherence vystupujícího paprsku.

4.2.2. *Působení nástroje*

Šíření paprsku v prostředí mezi tryskou a materiálem

Bezprostředně po výstupu paprsku z abrazivní trysky ztrácí kapalina původní prostorové omezení a prudce expanduje.

Interakce s materiálem

Mechanismus úběru materiálu je doposud málo prozkoumán. Řada odborníků, kteří se zabývají touto problematikou [5], [13] se shodují v tom, že na dezintegraci materiálu se podílí mechanismus řezání (cutting), únavy (fatigue) a lomu (fracture). Tyto mechanismy však nepůsobí jednotlivě, ale v různých kombinacích. Na jejich podíl v rámci výsledné deformace má mj. vliv:

- úhel dopadu abrazivních částic,
- velikost a tvar abrazivních částic,
- kinetická energie abrazivních částic,
- materiálové vlastnosti abrazivních částic,
- materiálové vlastnosti obráběného materiálu.

Výsledkem působení těchto dílčích mechanismů vzniká povrch, který je charakteristický svou duálností. Horní část řezu je poměrně hladká a od určité hloubky převládá rýhovaná oblast (obr. 4.6). Je to způsobeno tím, že paprsek ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se, čímž dochází ke změně mechanismu úběru, a to z převládajícího řezného opotřebení na deformační opotřebení [5].



Obr. 4.5 Rozdělení řezu na dvě zóny h_c a h_d dle Hashishe [13].

Podle Hashishe lze vypočítat hloubku řezného opotřebení h_c (kvalitní oblast) následujícím empirickým vztahem

$$h_c = \frac{\frac{v_a}{C_k} \cdot d_a}{\left(\frac{\pi \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot d_a^2}{14 \cdot m_a} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_e}{C_k}}, \quad (4.1)$$

kde je:

v_a	- rychlost pohybu abrazivních částic,	[m.s ⁻¹]
C_k	- koeficient charakteristické rychlosti,	[-]
d_a	- průměr usměrňovací trubice,	[m]
ρ_p	- hustota abrazivního materiálu,	[kg.m ⁻³]
v_p	- rychlost posuvu řezné hlavy,	[m.s ⁻¹]
m_a	- hmotnostní tok abraziva,	[kg.s ⁻¹]
v_e	- kritická rychlost abrazivních částic.	[m.s ⁻¹]

Obdobně lze podle tohoto autora vypočítat hloubku deformačního opotřebení h_d (nekvalitní oblast) vztahem

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_a \cdot \sigma_y}{2 \cdot (1-c) \cdot m_a \cdot (V_a - V_c)^2} + \frac{C_f}{d_a} \cdot \frac{V_a}{V_a - V_c}}, \quad (4.2)$$

kde je: σ_y - mez kluzu řezaného materiálu, [MPa]
 C_l - koeficient druhu řezaného materiálu, [-]
 C_f - koeficient odporu stěny materiálu. [-]

Potom celková hloubka řezu je dána vztahem

$$h = h_c + h_d. \quad (4.3)$$

Uvedené analytické vztahy jsou velmi složité, protože proces řezání AWJ ovlivňuje celá řada parametrů a faktorů. Nelze určit všechny faktory ovlivňující řezání, proto se teoretický výpočet může od skutečné hodnoty lišit i více jak o 50 % [5]. Tyto vztahy zde uvádím konkrétně, protože jsem je v diplomové práci využil pro nastavení rychlosti posuvu řezné hlavy.

Útlum paprsku

Útlum paprsku probíhá v prostoru záchytné nádrže, která je naplněna vodou. Záchytná nádrž má stanovenou minimální výšku určenou na základě hodnoty používaného pracovního tlaku kapaliny.

5. HODNOCENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHŮ

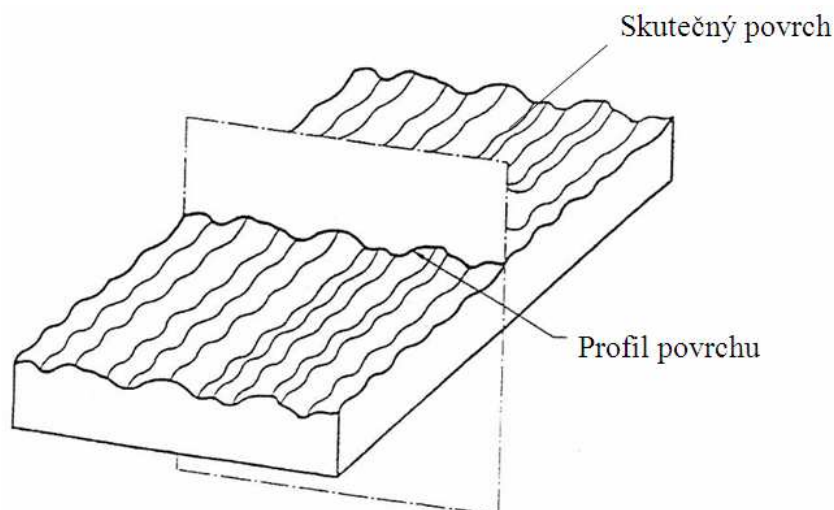
Žádný povrch není geometricky dokonale rovinný, obzvlášť pak technické povrchy. Tyto odchylky vznikají při přípravě povrchu a jsou důsledkem působení vnějších sil nebo prostředí. Rozlišujeme čtyři druhy nerovností [14]:

- *mimořádné nerovnosti* (makronerovnosti), jedná se o trhliny, náhodné nerovnosti odlitků a výkovků, nepravidelné rýhy,
- *vlnitost povrchu*, jedná se o periodicky opakující se nerovnosti, které vznikají hlavně při obrábění chvěním stroje, nástroje a obráběné součásti,
- *drsnost povrchu* (mikronerovnost), pravidelně se opakuje a je podmíněna technologickým pochodem,
- na mikronerovnost se ještě superponují *ultramikronerovnosti*, které jsou dány snahou dosáhnout nejstabilnějšího stavu krystalického povrchu.

5.1. Drsnost povrchu

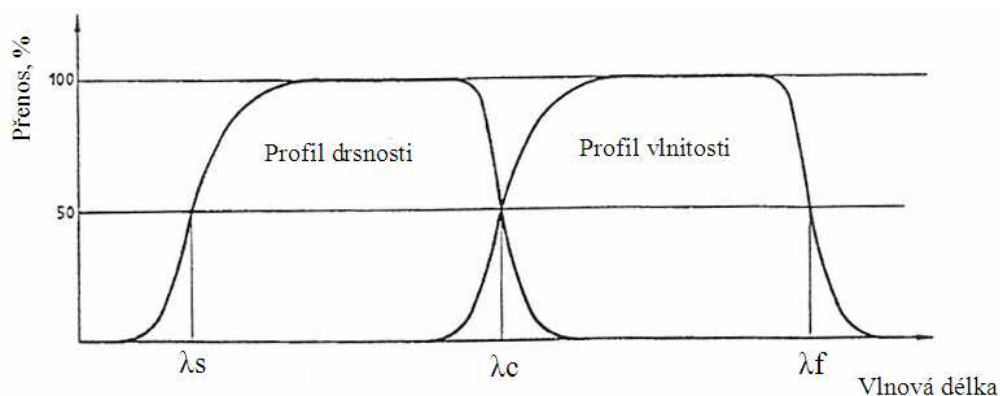
Problém posuzování nerovností (struktury povrchu) se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování struktury povrchu (obr. 5.1). Dosud se v technické praxi běžně používá k jejich hodnocení zjednodušená (normalizovaná) metoda využívající profil nerovnosti vzniklý v rovině řezu (2D) stanovený normativně:

- ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu [15]
- ČSN EN ISO 4288: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu [16]



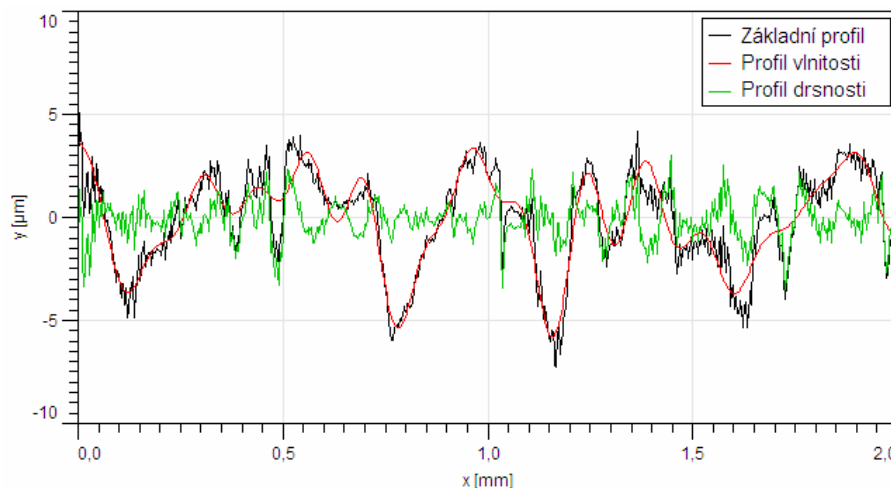
Obr. 5.1 Profil povrchu [15].

Při vlastním hodnocení sejmutého profilu formou číselných hodnot parametrů povrchu se uplatňují základny tvořené použitým typem filtru, který slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu. Jedná se o složky signálu různých vlnových délek, příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu [15] (obr. 5.2, obr. 5.3).



Obr. 5.2 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti.

- Filtr profilu – filtr rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky:
- λ_s filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,
 - λ_c filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti,
 - λ_f filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.



Obr. 5.3 Znáznornění signálu různých vlnových délek, příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti a drsnosti povrchu.

Základní profil (P profil – *primary profile*) – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny,

profil drsnosti (R profil – *roughness profile*) – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ,

profil vlnitosti (W profil – *waviness profile*) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c .

Drsnost povrchu charakterizují jednotlivé parametry drsnosti. Mezi nejpoužívanější normované parametry hodnocení drsnosti povrchu patří:

Střední aritmetická úchylka profilu R_a - je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky.

$$Ra = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \text{ nebo } Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|, \quad (5.1)$$

kde je: l_p - měřená délka, [m]
 $y(x)$ - funkce popisující profil, [-]
 $y(x_i)$ - souřadnice n bodů profilu povrchu [-]
v mezích měřené délky, $i = 1, 2, 3 \dots n \dots$

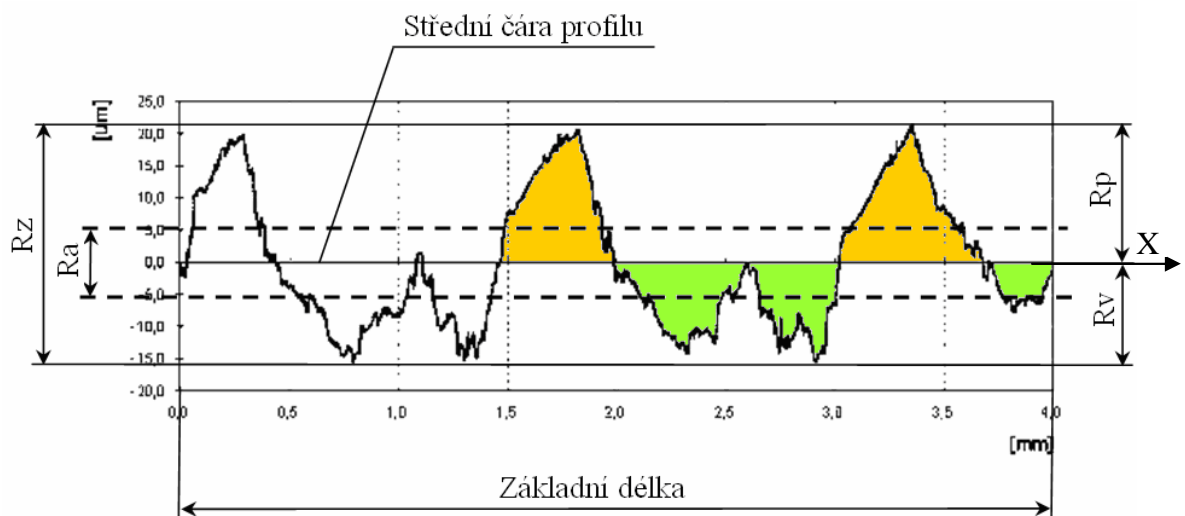
Největší výška nerovnosti profilu R_z - je výšková charakteristika drsnosti povrchu určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky.

$$R_z = R_p + R_v, \quad (5.2)$$

kde je: R_p - výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r [μm]

R_v - hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r [μm]

Na obr. 5.4 je uveden příklad drsnosti profilu s vyznačením jednotlivých parametrů drsnosti.



Obr. 5.4 Příklad profilu drsnosti.

Výstupek profilu – z povrchu ven směřující (z materiálu do okolního prostředí) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou x,

prohlubeň profilu – dovnitř směřující (z okolního prostředí do materiálu) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou x [15].

5.2. Měřicí prostředky

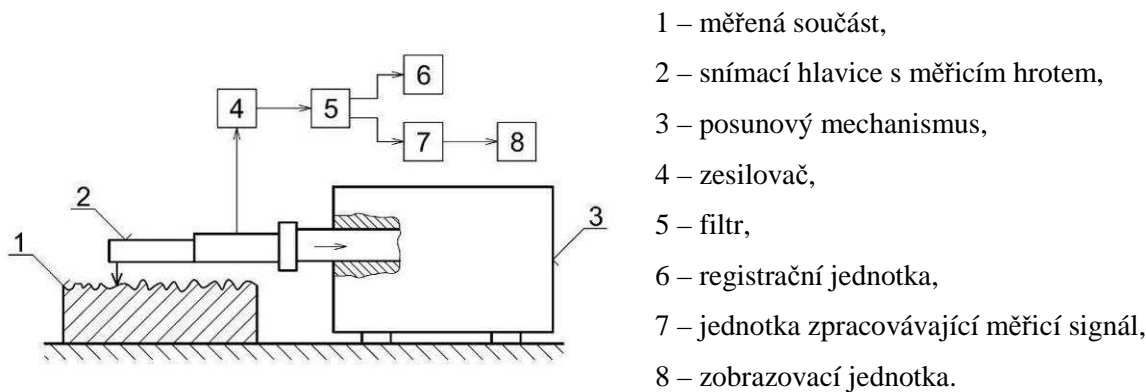
Kontrola kvality povrchů je zejména v dnešní době velmi významnou součástí přípravy povrchů u všech typů technologií používaných k jejich vytváření [17].

Od roku 1930, kdy byly vyvinuty první přístroje pro měření topografie povrchu, byl zaznamenán velký pokrok jak v metodách, tak i v zařízeních pro měření. Výrazným úspěchem 60. let bylo uplatnění digitálních metod, které také zaznamenaly možnost hodnocení povrchu metodou 3D [18].

Metody a přístroje pro měření topografie povrchu, jak je poměrně vyčerpávajícím způsobem uvádí literatura [18], lze zjednodušeně rozdělit na tři základní skupiny: *mechanické, optické a jiné*.

5.2.1. Mechanické metody

Mechanické (dotykové) metody jsou doposud nejrozšířenějšími metodami, zejména ve strojírenské praxi. Jejich výhodou je přímé měření a možnost použití pro všechny typy povrchů. Lze jimi převádět analogový záznam do digitální formy a také lze naměřené hodnoty použít jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Výhodou těchto metod je rovněž jejich přesná reprodukovatelnost, tj. schopnost zobrazit měřený geometrický profil opakovaně identicky. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě. Intenzita deformace povrchu hrotem závisí na tvrdosti povrchu. Ve většině případů dochází k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné nejen pro hodnocení povrchu, ale i pro výsledek měření [17], [18]. Na obr. 5.5 je uvedeno schéma kontaktního profilometru [19].



Obr. 5.5 Schematické znázornění principu kontaktního profilometru.

5.2.2. Optické metody

Vhodnou alternativou měření topografie povrchu dotykovými profilometry jsou *optické metody*. Jedná se o bezdotykové měření, čímž je vyloučeno poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Hloubka vnikání světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. Nevýhodou optických metod je jejich nepřímé měření, a proto je nutno experimentálně získaná data optickými metodami porovnávat (kalibrovat) s daty získanými kontaktním profilometrem [20].

5.2.3. Jiné metody

Existuje celá řada metod, které fungují na jiném principu než na mechanickém nebo optickém. Zde uvádím stručný výčet některých nejznámějších metod:

- Měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu – energetická ztráta výstupního proudu vzduchu určuje stupeň nerovnosti [18].
- RTG metoda – využívá atomárních vlastností materiálu povrchu po jejich iniciaci X-paprsky, jejichž vlnová délka je přibližně stejná jako vzdálenost atomu v krystalické mřížce.
- SEM (scanning electron microscopes) – je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibraci na parametry topografie povrchu (elektrony jsou urychlovány vysokonapětovým elektrostatickým polem mezi dvěma nebo třemi magnetickými čočkami).
- STM a AFM (scanning tunnelling microscopes a atomic force microscopes) – stanovují difference ve vlastnostech tunelového efektu (STM) a v charakteru meziatomárních sil (AFM) vlivem nerovnosti povrchu. Metody se aplikují společně, protože jejich výsledky se vzájemně doplňují, aby vytvářely i topograficky komplexní obraz snímaného povrchu.
- MFM (magnetic force microscopes) umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou, kalibrací a korelací určení funkčních vztahů popisujících topografii povrchu. [20].

6. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLŮ

Výchozím materiálem pro experimentální zkoušky byly tyče z technicky čisté mědi čtvercového průřezu 35x35 mm a délky 100 mm tažené za studena. Chemické složení použité mědi je uvedeno v tab. 6.1.

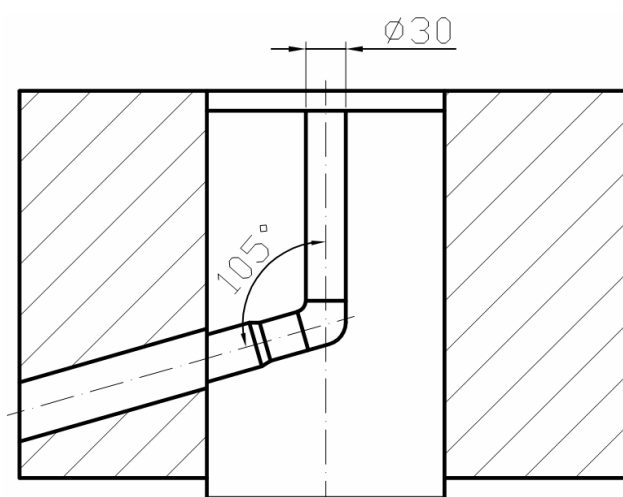
Tab. 6.1. Chemické složení Cu ČSN 42 3005 [wt. %].

Cu	Sn	As	O	Pb	Sb	Al	Fe	Se + Te	Bi
min. 95,5	max. 0,15	max. 0,10	max. 0,10	max. 0,10	max. 0,08	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,03	max. 0,01

6.1. Příprava vzorků úhlovým kanálovým protlačováním

Před samotným protlačováním byly polotovary čtvercového průřezu obrobeny na průměr 30 mm. Za účelem dosažení lepších mechanických vlastností a vyšší homogenity materiálu byly polotovary před protlačováním žíhány při teplotě 750°C po dobu 2 hodin.









K protlačování byla použita zápustka, která byla navržena pracovníky Katedry tváření materiálu, FMMI VŠB-TUO (obr. 6.1). Úhel mezi kanály použité ECAP zápustky činil 105°. K mazání kanálu byla použita látka HP 517. Byla zvolena deformační cesta Bc (otočení vzorku po každém průchodu o 90° ve stejném směru) doplněná záměnou předního konce vzorku za zadní. Tato deformační cesta je obecně považována za nejrychlejší způsob dosažení homogenní struktury tvořené rovnoosými zrny.



Obr.6.1 Schéma použité zápustky.

Technologií ECAP byla vytvořena sada sedmi vzorků, kde každý vzorek byl podroben jinému počtu průchodů zápustkou. Očekával jsem tedy, že vytvořená sada materiálů bude mít rozdílnou velikost zrna a jak vyplývá z Hall-Petchova vztahu (3.1), že se i mechanické parametry budou lišit. V tab. 6.2 je uveden přehled vytvořených vzorků.

Tab. 6.2 Přehled vzorků vytvořených metodou ECAP.

Označení	Počet protlačení	Foto	Poznámky
A	0		Výchozí polotovár
B	3		Za studena (20 °C)
C	4		Za tepla (300 °C)
D	5		Za studena (20 °C)
E	6		Za tepla (300 °C)
F	7		Za studena (20 °C)
G	8		Za tepla (300 °C)
H	9		Za studena (20 °C)

6.2. Metalografické výbrusy

Metalografické výbrusy byly provedeny za účelem strukturní analýzy a zjištění velikosti zrna d po jednotlivých průchodech.

Pro zviditelnění struktury byly vzorky nejprve broušeny na brusce KOMPAKT 1031 (obr. 6.2) na brusném papíru zrnitosti 600, 1200 a 2000 MESH, dále byly leštěny 20 s na přístroji firmy Struers LectroPol-5 (obr. 6.3) při napětí 24V v elektrolytu pod firemním označením D2. Nakonec byly vzorky leptány po dobu 4 s opět na přístroji Struers LectroPol-5 při napětí 2 V ve stejném elektrolytu.



Obr. 6.2 Bruska KOMPAKT 1031 pro metalografii.



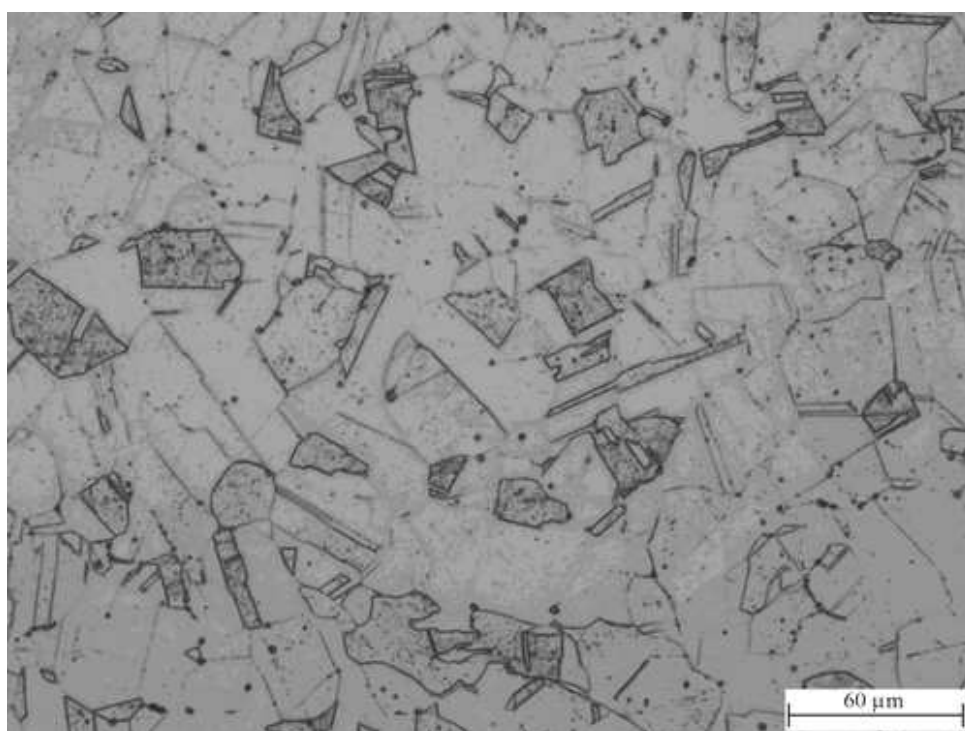
Obr. 6.3 Přístroj LectroPro-5 firmy Struers.

Pro pozorování metalografických výbrusů byl použit invertovaný mikroskop pro odražené světlo GX51 (obr. 6.4) s maximálním zvětšením 1000x.

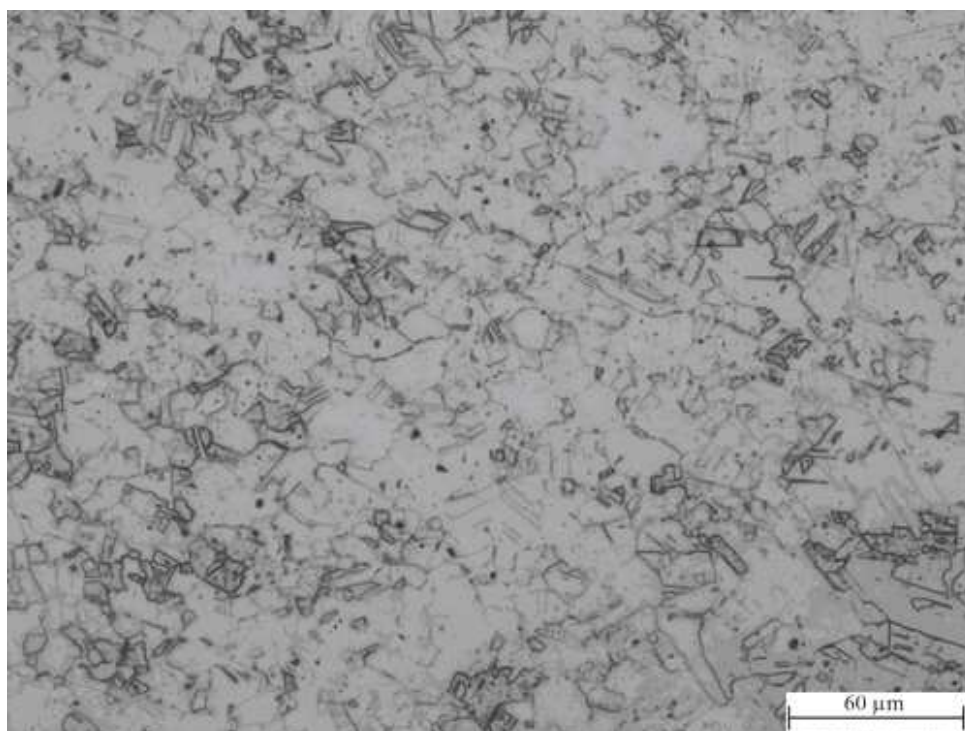


Obr. 6.4 Mikroskop GX51 firmy Olympus.

Na obr. 6.5 a obr. 6.6 jsou pro ilustraci uvedeny metalografické výbrusy pro výchozí materiál a materiál podrobený 9x ECAP, kde lze vidět kvalitativní změny struktury materiálu. V příloze č. 1 jsou uvedeny metalografické výbrusy pro všechny materiály. V tab. 6.3 jsou zaznamenány střední velikosti zrna pro jednotlivé materiály.



Obr. 6.5 Metalografický výbrus výchozího materiálu (označení A).



Obr. 6.6 Metalografický výbrus materiálu podrobeného 9x ECAP (označení H).

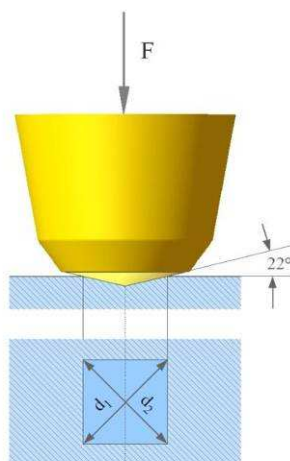
Tab. 6.3 Velikosti zrna pro jednotlivé materiály.

vzorek	Počet protlačení / teplota	Střední průměr zrna d [μm]	Číslo velikosti zrna G [-]
A	0	19	8
B	3 (20 °C)	8,8	11
C	4 (300 °C)	8,7	10
D	5 (20 °C)	8,1	11
E	6 (300 °C)	7,3	11
F	7 (20 °C)	6,9	11
G	8 (300 °C)	6,7	11
H	9 (20 °C)	6,5	11

Z tab. 6.3 lze vyčíst, že k největšímu zjemnění zrna došlo u materiálu označeného písmenem H. Bylo dosaženo snížení velikosti středního průměru zrna $d = 6,5 \mu\text{m}$, a to z původních $19 \mu\text{m}$. Číslo velikosti zrna bylo stanoveno na základě přílohy č.2.

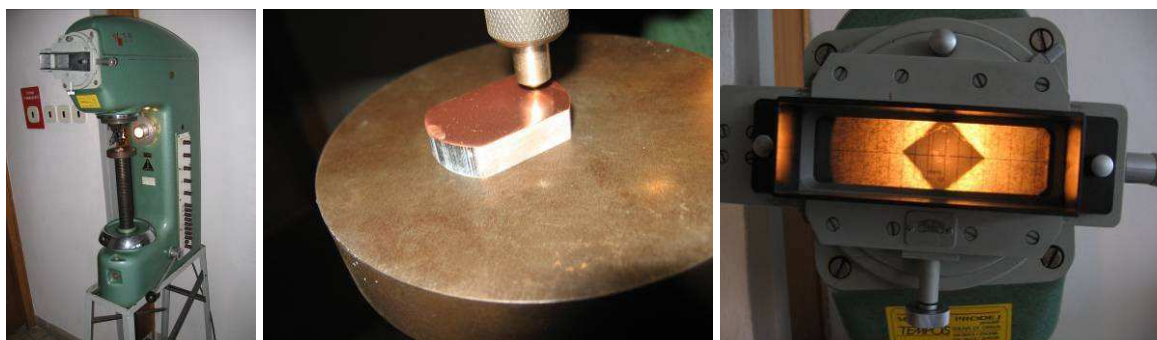
6.3. Měření tvrdosti

U všech vzorků byla měřena tvrdost podle Vickerse HV10 s cílem určit difference mezi velikostí zrna a tvrdostí. Princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa - indentoru - do zkoumaného materiálu a následného zjišťování míry deformace tohoto materiálu. Jakožto indentor byl použit diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° [21]. Měřítkem tvrdosti materiálu jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu (obr. 6.7). Vickersova zkouška je značně univerzální. Lze ji použít na tvrdé i měkké materiály. Její výhodou je také to, že výsledná hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle, jelikož vtisky jsou pro různé síly geometricky přibližně stejné.



Obr. 6.7 Princip měření tvrdosti podle Vickerse [22].

Tvrdost byla měřena na stěně kolmé na směr protlačování (obr. 6.8). Na každém vzorku bylo provedeno 7 měření a ze získaných hodnot byl vypočítán aritmetický průměr. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.4.



Obr. 6.8 Zařízení pro měření tvrdosti podle Vickerse.

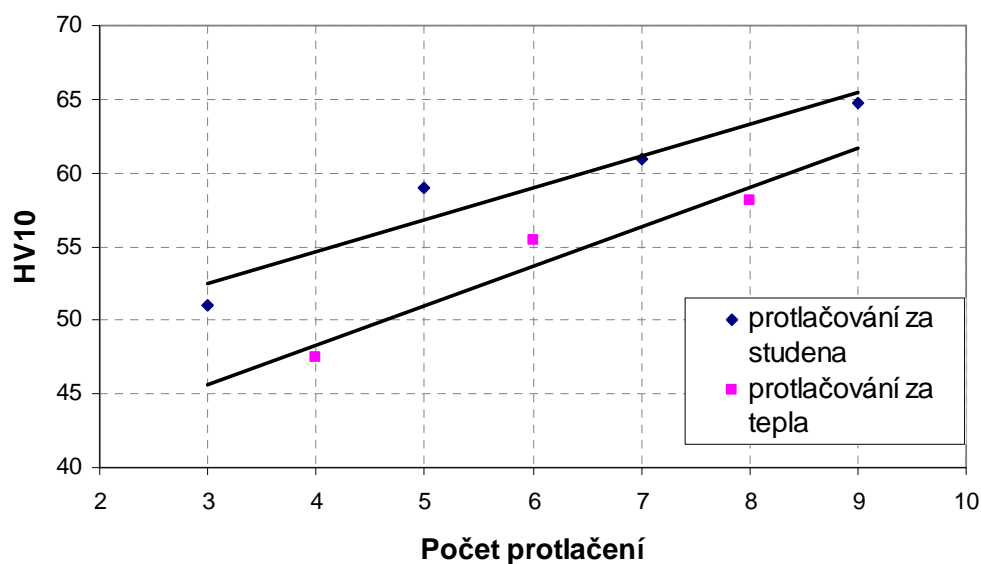
Tab. 6.4 Naměřené hodnoty tvrdosti HV 10 pro jednotlivé materiály.

vzorek	číslo měření							průměrná hodnota HV	směrodatná odchylka
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.		
A	37,8	36,8	37,1	36,3	39,6	35,9	37,4	37,3	1,2
B	49,0	50,0	50,0	51,2	50,2	50,5	53,6	50,6	1,5
C	47,0	47,3	47,8	47,3	46,9	48,2	47,8	47,5	0,5
D	58,7	59,7	60,0	62,4	60,8	58,3	58,8	59,8	1,4
E	58,1	57,7	54,4	54,7	49,9	57,2	56,3	55,5	2,8
F	60,9	59,6	59,1	59,6	61,1	64,5	60,8	60,8	1,8
G	57,2	50,0	49,7	50,7	49,9	49,7	50,8	51,1	2,7
H	62,3	62,4	64,3	66,5	67,3	68,7	61,7	64,7	2,8

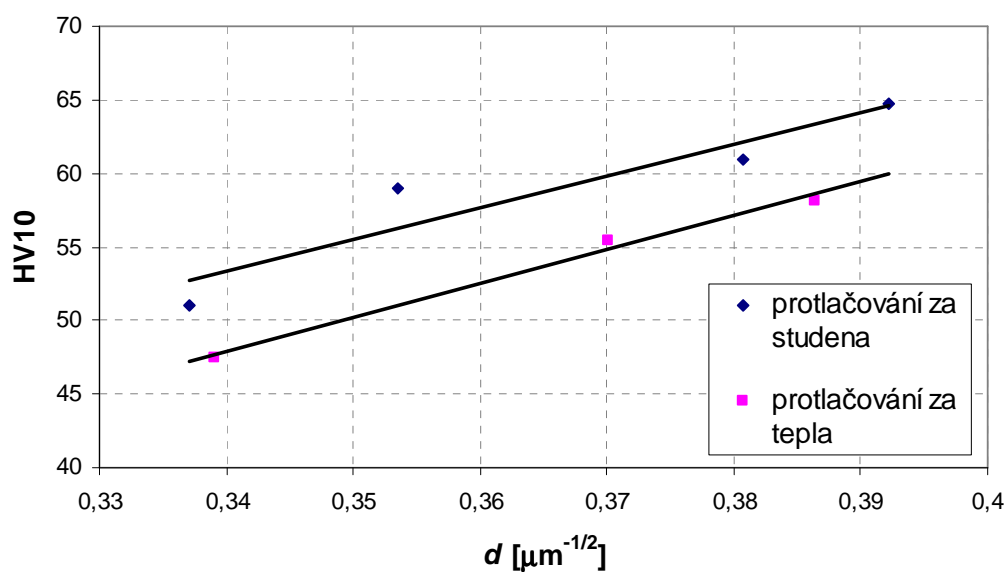
Příklad výpočtu směrodatné odchylky pro vzorek A v tab. 6.4

$$S(D) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{D} - D_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{8,79}{7-1}} = 1,2 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Průměrné hodnoty naměřené tvrdosti HV z tab. 6.4 jsou pro snadnější interpretaci graficky zobrazeny na obr. 6.9 a obr. 6.10.



Obr.6.9 Závislost tvrdosti HV 10 na počtu protlačení.



Obr. 6.10 Závislost tvrdosti HV 10 na velikosti zrna d .

Z obr. 6.9 je patrné, že se pro zmenšující velikost zrna lineárně zvyšuje tvrdost materiálu. Důležitým zjištěním je také rozdílná tvrdost pro protlačování za studena a za tepla při stejné velikosti zrna. Z tohoto zjištění vyplývá dílčí závěr, že velikost zrna není rozhodující pro dosažení požadovaných mechanických vlastností.

6.4. Příprava vzorků hydroabrazivním dělením

Vzorky vytvořené technologií ECAP byly rozřezány technologií abrazivního vodního paprsku (AWJ) na Ústavu geoniky AV ČR v.v.i. v Ostravě. Bylo použito vysokotlaké čerpadlo PTV-37-60 Pump (obr. 6.11). V tab 6.5 jsou uvedeny parametry použitého čerpadla.



Obr. 6.11 Čerpadlo PTV-37-60 Pump firmy PTV spol. s r.o.

Tab. 6.5 Parametry použitého čerpadla PTV-37-60 Pump.

Multiplikátor	dvojčinný
Maximální pracovní tlak	415 MPa
Maximální průtočné množství	3,68 l.min ⁻¹
Elektrický příkon	37 kW

Technologie AWJ byla zvolena jednak proto, že u této technologie nedochází k žádnému tepelnému ovlivnění materiálu (studený řez), tak i proto, že na vytvořeném povrchu lze sledovat vliv velikosti zrna na topografii vytvořeného povrchu.

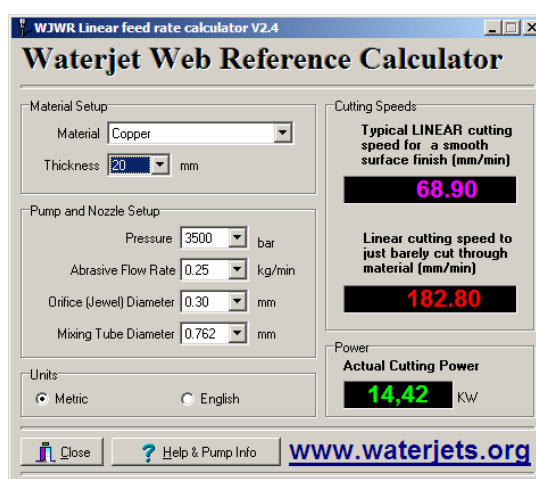
V tab. 6.6 jsou znázorněny vstupní hodnoty a faktory zařízení, při kterých se prováděla výroba vzorků. Všechny faktory použité při experimentu byly konstantní, jen rychlost posuvu řezné hlavy se měnila od 30 do 130 mm.min⁻¹.

Tab. 6.6 Technologické faktory při řezání vzorků.

Technologické faktory	značka	jednotka	hodnota
tlak kapaliny	P	MPa	360
průměr vodní trysky	d_o	mm	0,3
průměr usměrňovací trubice	d_a	mm	0,8
délka usměrňovací trubice	l_a	mm	76
hmotnostní průtok abraziva	m_a	g.min ⁻¹	200
vzdálenost trysky od povrchu	L	mm	2
rychlost posuvu	v_p	mm.min ⁻¹	30, 50, 70, 90, 110, 130
velikost abraziva	-	MESH	80
materiál abraziva	-	-	Granát Barton

Pro stanovení maximální rychlosti v_p posuvu řezné hlavy jsem vycházel ze vzorců (1), (2), (3) uvedených v kapitole 4. Výpočtem jsem dospěl k rychlosti posuvu pro dělicí řez $v_p = 155 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

















































Pro komparaci jsem využil také program AbrCalc (obr. 6.12), který je volně k dispozici na stránkách firmy OMAX [23]. Rychlost posuvu řezné hlavy pro dělicí řez vychází o $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ více než na základě předchozího výpočtu. Po provedení kontrolního řezu jsem zvolil rychlost nižší, a to $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Při této rychlosti ovšem nedošlo k prořezání materiálu v celé tloušťce, proto jsem snížil rychlost na hodnotu $130 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 6.12 Program AbrCalc firmy OMAX.

V tab. 6.7 je přehled všech vzorků vytvořených hydroabrazivním dělením. Z každého materiálu bylo vytvořeno 6 vzorků, každý vzorek byl dělen jinou rychlostí v_p posuvu řezné hlavy. Celkem tedy bylo analyzováno 48 ploch.

Tab. 6.7 Přehled vzorků vytvořených hydroabrazivním dělením.

Ozn. vz.	Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]						Poznámka
	30	50	70	90	110	130	
A							Výchozí stav
B							Za studena
C							Za tepla
D							Za studena
E							Za tepla
F							Za studena
G							Za tepla
H							Za studena

6.5. Metodika měření topografie povrchu

Vytvořené vzorky byly měřeny kontaktním profilometrem Surftest SJ401 (obr. 6.13) a Hommel Tester T8000 (obr. 6.14).



Obr. 6.13 Kontaktní profilometr Mitotoyo Surftest SJ401.



Obr. 6.14 Kontaktní profilometr Hommel Tester T8000.

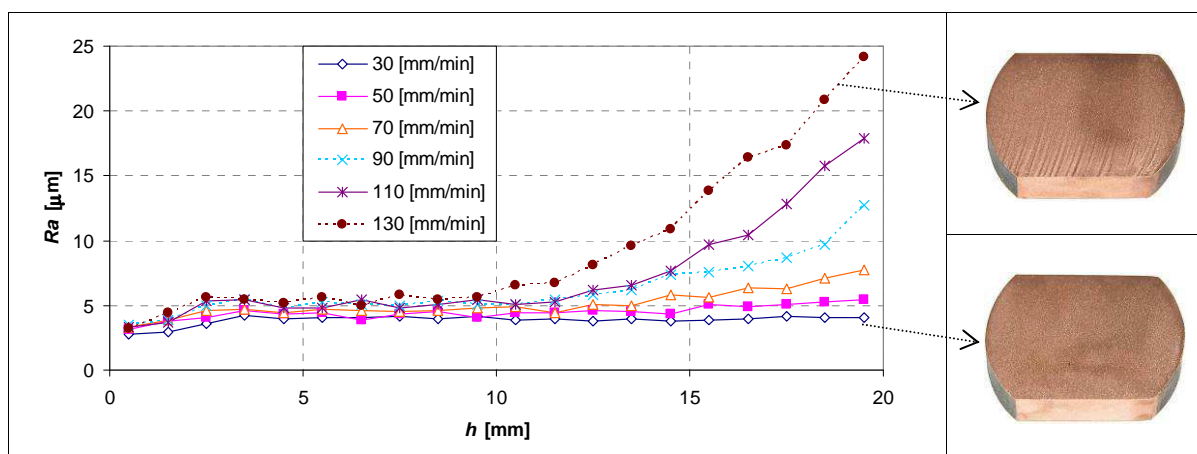
Každý vzorek byl proměřen ve 20-ti měřicích liniích (obr. 6.15). Z každé linie byl získán signál o distribuci nerovností povrchu, který byl vyhodnocen a statisticky zpracován.



Obr. 6.15 Fotografie povrchu vytvořeného AWJ s vyznačenými 20-ti měřicími liniemi.

Pro posouzení vlivu velikosti zrna materiálu na texturu povrchu byl vybrán jako základní hodnotící parametr Ra (tj. střední aritmetická odchylka povrchu) [15]. Tento parametr představuje průměrnou drsnost na základní délce, je u něj potlačen vliv výrazných a netypických výstupků a prohlubní. Měření bylo prováděno na 5-ti po sobě jdoucích základních délkách ($l_r = 2,5$ mm) a ze získaných dat byla stanovena průměrná hodnota Ra .

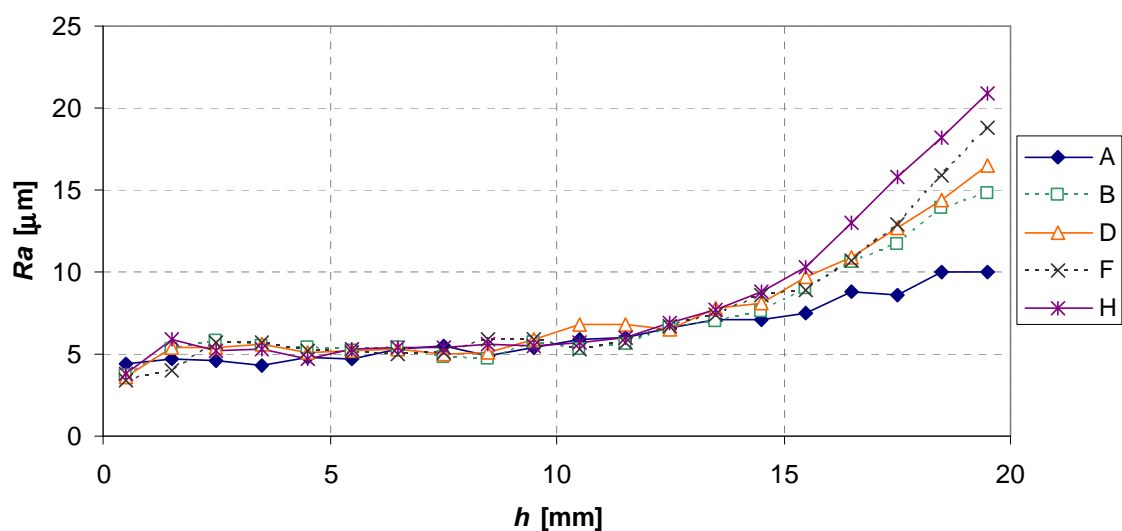
Na obr. 6.16 je uvedena závislost drsnosti Ra na hloubce řezu h pro rychlosti posuvu řezné hlavy AWJ 30, 50, 70, 90, 110 a 130 mm.min⁻¹ a kvalitativní porovnání povrchů při rychlostech 30 a 130 mm.min⁻¹.



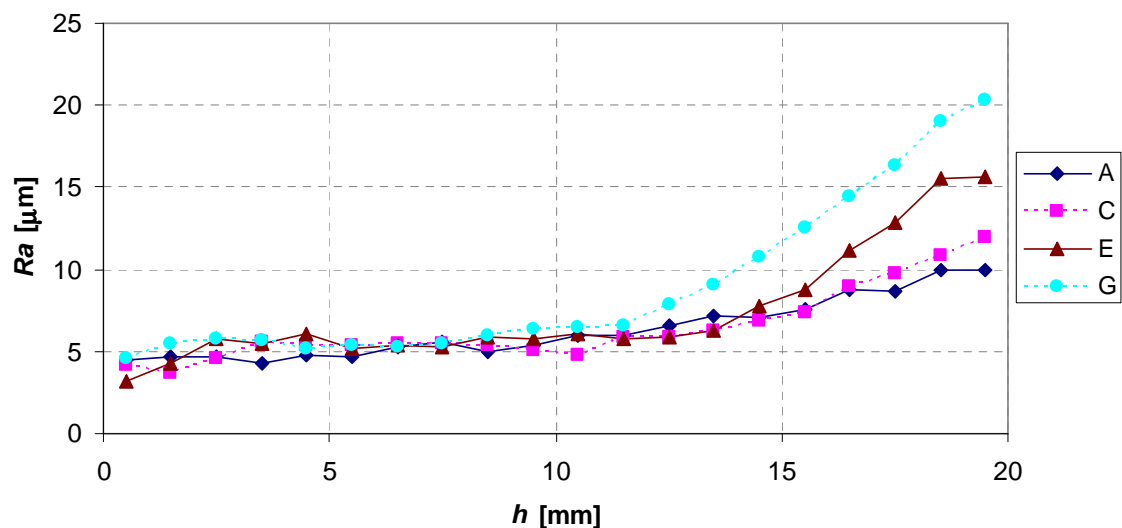
Obr. 6.16 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu h pro 6 rychlostí posuvu řezné hlavy AWJ a kvalitativní porovnání povrchů při rychlostech 30 a 130 mm.min⁻¹.

Z grafu je patrný vliv rychlosti řezné hlavy na texturu povrchu. Lze konstatovat, že výslednou texturu povrchu ovlivňují jak technologické parametry (např. rychlost řezné hlavy v_p), tak i mechanické vlastnosti obrobku (např. tvrdost).

Na obr. 6.17 a 6.18 jsou uvedeny grafy, na kterých můžeme pozorovat vliv různých velikostí zrna vzniklých po jednotlivých průchodech technologií ECAP na textuře povrchu. Tyto materiály byly děleny za podmínek uvedených v tab. 6.5 rychlostí posuvu řezné hlavy $110 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 6.17 Závislost drsnosti povrchu Ra na hloubce h , a to pro materiály protlačované za studena, rychlost posuvu ř



Obr. 6.18 Závislost drsnosti povrchu Ra na hloubce h , a to pro materiály protlačované za tepla.

Z obr. 6.17 a 6.18 je patrné, že vliv velikosti zrna na texturu povrchu se projevil jak u materiálů protlačovaných za studena, tak u materiálů protlačovaných za tepla. Ovšem tento vliv lze pozorovat až od hloubky řezu $h \cong 12$ mm při rychlosti posuvu řezné hlavy $110 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Je to způsobeno tím, že nástrojem je flexibilní nástroj AWJ, který má na výstupu z trysky určitou kinetickou energii a tuto postupně ztrácí. Čím je vyšší pevnost a tvrdost materiálu, tím dochází k rychlejšímu poklesu kinetické energie paprsku a k rychlejšímu vychylování paprsku, což má za následek zhoršení kvality řezné stěny.

7. ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce je uveden přehled technologií pro přípravu jemnozrnných materiálů pomocí extrémní plastické deformace. Detailněji je popsána metoda úhlového kanálového protlačování (ECAP). Tato metoda byla využita pro vytvoření sady vzorků v experimentální části. Dále je v práci proveden rozbor technologie hydroabrazivního dělení materiálů. Tato technologie byla zvolena pro dělení vytvořených jemnozrnných materiálů. V poslední kapitole teoretické části je nastíněna problematika hodnocení nerovností povrchů s uvedením nejčastěji používaných parametrů drsnosti.

Cílem diplomové práce bylo určení vlivu velikosti zrna na mechanické vlastnosti a na topografii povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením materiálu. Tohoto cíle bylo dosaženo měřením, analýzou a interpretací dat.

V experimentální části jsou uvedeny podmínky vytváření jemnozrnných materiálů technologií úhlového kanálového protlačování (ECAP) s uvedením chemického složení použitého materiálu. Technologií ECAP byla vytvořena sada sedmi vzorků, kde každý vzorek byl podroben jinému počtu průchodů zápusťkou. Očekával jsem tedy, že vytvořená sada materiálů bude mít rozdílnou velikost zrna a podle Hall-Petchova vztahu rozdílné mechanické parametry. Tento předpoklad jsem ověřil vytvořením metalografických výbrusů a stanovením střední velikosti zrna pro jednotlivé materiály. Změny ve velikosti zrna se jednoznačně potvrdily. Z původní velikosti zrna 19 μm bylo po 9-ti průchodech ECAP zápusťkou dosaženo velikosti zrna 6,5 μm . Původně jsem předpokládal (na základě prostudované literatury), že po 9-ti průchodech ECAP zápusťkou bude velikost zrna menší než 1 μm . Domnívám se, že menší zjemnění zrna bylo zapříčiněno větším úhlem mezi kanály zápusťky a větším průměrem protlačovaného vzorku než uvádí literatura.

Pro posouzení změny mechanických parametrů v závislosti na počtu protlačení jsem vybral měření tvrdosti dle Vickerse. Tímto měřením byla zjištěna závislost mezi počtem protlačení a tvrdostí, respektive mezi velikostí zrna a tvrdostí. Z původní tvrdosti u neprotlačeného materiálu 37,3 HV10 byl největší nárůst zjištěn u materiálu 9x protlačeného a činil 64,7 HV10, což představuje zvýšení tvrdosti o více jak 70 %. Zajímavým zjištěním byl rozdílný nárůst tvrdosti pro materiály protlačované za studena a za tepla. Pro materiály protlačované za zvýšené teploty (300°C) byl asi o 10 % nižší než

pro materiály protlačované za pokojové teploty, a to v důsledku snížení deformačního odporu materiálu.

Pro posouzení vlivu velikosti zrna na texturu povrchu při hydroabrazivním dělení byla vytvořena technologií abrazivního vodního paprsku sada 48-mi vzorků. Tyto vzorky byly vytvořeny za konstantních podmínek, jediným proměnným parametrem byla rychlost posuvu řezné hlavy. Všechny vzorky byly proměřeny ve 20-ti měřicích liniích, a to kontaktními profilometry Hommel Tester T8000 a Surftest SJ401. Měřením se prokázalo, že velikost zrna má velký vliv na výslednou texturu povrchu.

Výsledky získané v diplomové práci budou využity jako dílčí vstup pro stanovení ekvivalentů mechanických parametrů materiálů z topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním proudem v rámci řešení projektu GAČR 101/09/0650. Dále je možno prezentované výsledky využít ve spolupráci s odborníky Ústavu geoniky AVČR, v.v.i. v Ostravě, firmy AQUACLEAN v Bratislavě a firmy REZMAT v Dubnici nad Váhom.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] VALIEV, R.Z., ESTRIN, Y., HORITA, Z. et al. Producing bulk ultrafine grained materials by severe plastic deformation. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2006, vol. 58, no. 4, p. 33-39. ISSN 1047-4838.
- [2] ZRNÍK, J., et al. *Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*, IV. Řada, Evropská strategie výrobních procesů, ČSNMT, 2007. ISBN 978-80-7329-153-2.
- [3] EL-HOFY, H. *Advanced machining processes: Nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw-Hill, 2005, 253 s. ISBN 0-07-145334-2.
- [4] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava: Miroslav Mračko. 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [6] HUANG, J., et al. Development of repetitive corrugation and straightening. *Materials Science and Engineering*, 2004, vol. 371, no. 1-2, p. 35-39. ISSN 0921-5093.
- [7] RICHERT, M., PETRYK, H., STUPKIEWICZ, S. Grain refinement in AlMgSi alloy during cyclic. *Archives of metallurgy and materials*, 2007, vol. 52, no. 1, p. 49-54. ISSN 1733-3490.
- [8] BEYGELZIMER, Y., et al. Useful properties of twist extrusion. *Materials Science and Engineering A*, 2009, vol. 503, no. 1-2, p. 14-17. ISSN 0921-5107.
- [9] SAITO, Y., et al. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*, 1998, vol. 39, no. 9, p. 1221-1227. ISSN 1359-6462.
- [10] CHEN Z.H., et al. Effect of equal-channel angular rolling pass on microstructure and properties of magnesium alloy sheets. *Materials and manufacturing processes*, 2007, vol. 22, no. 1-2, p. 51-56. ISSN 1042-6914.
- [11] SITEK, L. Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření. Doktorská disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2000, Fakulta strojní.
- [12] VAŠEK, J., MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J. *Abrasives for AWJ cutting*. Academy of Sciences, Ostrava, 2002.

- [13] HASHISH, M.: Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets. Trans. of the ASME, *Journal of Eng. Mat&Tech*, vol. 106, no. 1, 1984.
- [14] PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty, VŠB-TU FS, Ostrava, 1994, 71 s. ISBN 80-7078-235-8.
- [15] ČSN EN ISO 4287 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu, Praha, ČNI, 1999.
- [16] ČSN EN ISO 4288 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu, Praha, ČNI, 1999.
- [17] OHLÍDAL, M., PÁLENÍKOVÁ, K.: Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při hodnocení kvality povrchu. *Jemná mechanika a optika*, 2004, č. 9, s. 251-259. ISSN 0447-6441.
- [18] BUMBÁLEK, B., Obvody, V., Ošřádal, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989.
- [19] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [20] VALÍČEK, J.: *Snímání kvality povrchu materiálu pro řízení technologie kapalinového paprsku: doktorská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Institut fyziky, 2003, 92 s.
- [21] ČSN EN ISO 6507-1 (ČSN 42 0374) - Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda, Praha, ČNI, 2006
- [22] Wikipedia, [cit. 2009-05-10], dostupný na WWW:
< <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/VickersSkizze.jpg> >
- [23] AbrCalc, [cit. 2009-05-10], software dostupný na WWW:
< http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=54 >

PUBLIKACE AUTORA SOVISEJÍCÍ S DANOU PROBLEMATIKOU

- [1] HLAVÁČEK, P., VALÍČEK, J. Measurement of the texture machined surfaces on fine-grained materials [CD]. In *3rd Year of International Conference for Young Researchers and PhD. Students ERIN 2009*, Faculty of Mechanical Engineering in VŠB – TUO, 2009, p. 51. ISBN 978-80-248-1982-2.
- [2] VŠB – TU Ostrava. Zařízení pro generování modulací kapalinového toku. Původci: Milena KUŠNEROVÁ, Jan VALÍČEK, Petr HLAVÁČEK, Sergej HLOCH. Česká republika. Užitný vzor 19423. 16.3.2009.
- [3] HLAVÁČEK, P., VALÍČEK, J. Využití optické stínové metody při hodnocení kvality povrchu vytvořeného abrazivním vodním paprskem. In *Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v potravinárstve a v odpadovom hospodárstve. Zborník z medzinárodnej študentskej vedeckej konferencie ŠVOČ 2008*. Nitra: SPU. 2008. s. 73–78. ISBN 978-80-8069-878-2.
- [4] VALÍČEK, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., DRŽÍK, M., KUŠNEROVÁ, M., ČEP, R. Criterion C – Based evaluation of the topography of abrasive waterjet – produced surfaces. In *MM Science Journal*, December 2008, no. 4, p. 53 – 55. ISSN 1803–1269.
- [5] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., HLOCH, S., OHLÍDAL, M., LUPTÁK, M., GOMBÁR, M., RADVANSKÁ, A., HLAVÁČEK, P., PÁLENÍKOVÁ, K. Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2007). ISSN 0890-6955.
- [6] VALÍČEK, J., PÁLENÍKOVÁ, K., HLAVÁČEK, P., KUŠNEROVÁ, M., WYSLYCH, P. Criterial proposal for evaluation of surface texture created by the abrasive waterjet. In *8th International Scientific Conference on Technology Systems Operation, Prešov, 21-23 November 2007*. Edit. by S. Hloch, Prešov, Slovak Republic, 2007, p. 262-266. ISBN 978-80-8073-900-3.

- [7] VALÍČEK, J., HLOCH, S., OHLÍDAL, M., HLAVÁČEK, P., PÁLENÍKOVÁ, K. Měření a analýza nerovností povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem. *Jemná mechanika a optika*, 2007, č. 3, s. 86-89. ISSN 0447-6441.
- [8] VALÍČEK, J., HLOCH, S., GOMBÁR, M., ČEP, R., HLAVÁČEK, P., KLICHOVÁ, D., KLICH, J., PLAČEK, M. Aplikace bezkontaktní optické metodiky měření a interpretace získaných výsledků. In *Metal 2007, Hradec nad Moravicí, květen 2007*, CD sborník přednášek – přednáška číslo 181, TANGER s.r.o., Ostrava, 2007. ISBN 978-80-86840-33-8.
- [9] HLAVÁČEK, P. Měření a analýza nerovností povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem. In *Studentská tvůrčí a odborná činnost STOČ 2006 : sborník anotací*, VŠB – TU Ostrava 27. dubna 2006.
- [10] HLAVÁČEK, P., PLAČEK, M., ČEP, R., VALÍČEK, J. Měření a analýza nerovností povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem. In *Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v potravinárstve a v odpadovom hospodárstve. Zborník z medzinárodnej študentskej vedeckej konferencie ŠVOČ 2007*, Nitra: SPU, 2007, s. 73 – 78. ISBN 978-80-8069-878-2.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Metalografické výbrusy.

Příloha 2 – Tabulka pro stanovení velikosti zrna.